

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **08316581 A**

(43) Date of publication of application: **29.11.96**

(51) Int. Cl

H01S 3/18
H01L 33/00

(21) Application number: **07120281**

(71) Applicant: **SANYO ELECTRIC CO LTD**

(22) Date of filing: **18.05.95**

(72) Inventor: **HATA MASAYUKI**

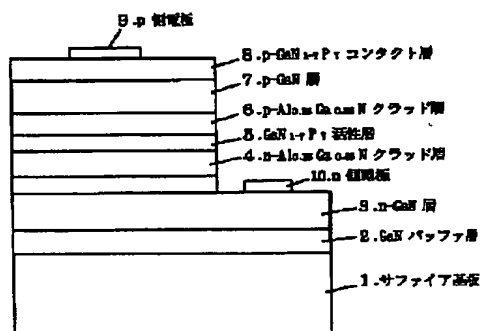
(54) **SEMICONDUCTOR DEVICE AND
SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING ELEMENT**

(57) Abstract:

PURPOSE: To obtain a semiconductor device including an active layer having low lattice mismatch rate with respect to a GaN based growth layer in which the band gap can be decreased while suppressing increase of the lattice mismatch rate.

CONSTITUTION: A GaN buffer layer 2, an n-GaN layer 3, an n-Al_{0.15}Ga_{0.85}N clad layer 4, a GaN_{1- γ} YPY active layer 5, a p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N clad layer 6, a p-GaN layer 7 and a p-GaN_{1- γ} YPY contact layer 8 are formed sequentially on a sapphire substrate 1. The lattice mismatch rate rate of the active layer with respect to the Al_{0.15}Ga_{0.85} clad layers 4, 6 is decreased by employing GaN_{1- γ} YPY as the material of active layer. Good ohmic characteristics are attained while suppressing increase of the lattice mismatch rate with respect to the p-GaN layer 7 by inserting the p-GaN_{1- γ} YPY contact layer 8 between the p-GaN layer 7 and a p-side electrode 9.

COPYRIGHT: (C)1996,JPO



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-316581

(43) 公開日 平成8年(1996)11月29日

(51) Int. Cl. ⁶

H01S 3/18

H01L 33/00

識別記号

庁内整理番号

F I

H01S 3/18

H01L 33/00

技術表示箇所

C

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全6頁)

(21) 出願番号 特願平7-120281

(22) 出願日 平成7年(1995)5月18日

(71) 出願人 000001889

三洋電機株式会社

大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号

(72) 発明者 畑 雅幸

大阪府守口市京阪本通2丁目5番5号 三

洋電機株式会社内

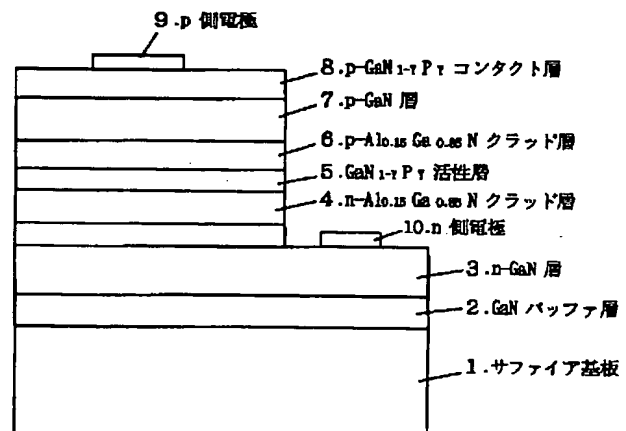
(74) 代理人 弁理士 福島 祥人

(54) 【発明の名称】 半導体装置および半導体発光素子

(57) 【要約】

【目的】 GaN系成長層に対する格子不整合率が小さく、かつ格子不整合率の増大を抑制しつつバンドギャップを小さくすることが可能な活性層を有する半導体装置を提供することである。

【構成】 サファイア基板1上にGaNバッファ層2、n-GaN層3、n-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層4、GaN_{1-x}P_x活性層5、p-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層6、p-GaN層7およびp-GaN_{1-x}P_xコンタクト層8を順に形成する。活性層の材料としてGaN_{1-x}P_xを用いることによりAl_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層4、6に対する活性層の格子不整合率を小さくする。p-GaN_{1-x}P_xコンタクト層8をp-GaN層7とp側電極9との間に挿入することにより、p-GaN層7との格子不整合率の増大を抑制しつつ良好なオーミック特性を得る。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つと窒素および燐を含む混晶半導体とのヘテロ構造からなる半導体層を含むことを特徴とする半導体装置。

【請求項2】 ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つと窒素および燐を含む混晶半導体とのヘテロ構造により形成された活性領域を含むことを特徴とする半導体装置。

【請求項3】 ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる半導体発光素子において、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つと窒素および燐を含む混晶半導体からなる発光領域を設けたことを特徴とする半導体発光素子。

【請求項4】 ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる成長層上に電極が形成された半導体装置において、前記窒化物半導体と前記電極との間にガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐を含む混晶半導体からなるオーミックコンタクト層を設けたことを特徴とする半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、GaN（窒化ガリウム）、AlN（窒化アルミニウム）もしくはInN（窒化インジウム）またはこれらの混晶からなる成長層を有する半導体装置および半導体発光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】直接遷移型のバンド構造を有するGaN系は、赤色から紫外の光を発する発光ダイオード、半導体レーザ素子等の半導体発光素子の材料として有望である。GaNは紫外の光を発するので、青緑色から青色の発光を得るために、従来は、活性層の材料としてGaInNを用いている。図4は従来のGaN系青色発光ダイオードの構造を示す断面図である。

【0003】図4において、サファイア（Al₂O₃）基板11上に、GaNバッファ層12、n-GaN層13、n-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層14、Ga_{0.94}In_{0.06}N活性層15、p-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層16およびp-GaN層17が順に形成されている。p-GaN層17からn-GaN層13の上部領域までがエッチングされ、p-GaN層17の上面にp側電極18が形成され、n-GaN層13の上面にn側電極19が形成されている。

【0004】図4の発光ダイオードでは、Ga_{0.94}In_{0.06}N活性層15をn-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層14およびp-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層16で挟

んだダブルヘテロ構造のpn接合を有し、青色から青緑色の光を発生することができる。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】上記のように、従来のGaN系発光ダイオードでは、活性層の材料としてGa_{1-x}In_xNを用いている。Ga_{1-x}In_xNのバンドギャップE_gは次式により求められる。

【0006】

$$E_g = 3.44 - 1.49X \quad \dots (1)$$

ここで、XはGa_{1-x}In_xN中のInの組成比である。式(1)から、Ga_{1-x}In_xNのバンドギャップE_gを3.35eVとするためには、In組成比Xを0.06とする必要がある。

【0007】一方、Ga_{1-x}In_xNの格子定数aは次式により求められる。

$$a = 3.19 + 0.35X \quad \dots (2)$$

式(2)から、Ga_{1-x}In_xN中のIn組成比Xが0.06のとき、格子定数aは3.211となる。

【0008】他方、従来のGaN系発光ダイオードでは、クラッド層の材料としてAl_{0.15}Ga_{0.85}Nを用いている。Al_{0.15}Ga_{0.85}Nの格子定数bは次式により求められる。

【0009】

$$b = 3.19 - 0.08Z \quad \dots (3)$$

したがって、上記従来の発光ダイオードにおけるクラッド層14、16に対する活性層15の格子不整合率は(3.178-3.211)/3.178=-1.04[%]となる。

【0010】このように、従来のGaN系発光ダイオードにおいては、活性層の材料としてGa_{1-x}In_xNを用いているので、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対する活性層の格子不整合率が大きく、格子欠陥が多いという問題がある。

【0011】特に、従来のGaN系発光ダイオードでは、青色の光を効率良く発生するために、In組成比Xを大きくして活性層のバンドギャップを小さくすると、Ga_{1-x}In_xNの格子定数aが大きくなり、Al_{0.15}Ga_{0.85}N層に対する格子不整合率が大きくなる。それにより、格子欠陥が多くなり、素子の寿命が短くなるという問題がある。

【0012】一方、電極と成長層との間でオーミック特性を得るためには、電極に接触する層のバンドギャップをできるだけ小さくすることが望ましい。そのため、上記の従来の発光ダイオードでは、p側電極18とp-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層16との間にp-GaN層17を挿入している。しかしながら、さらにオーミック特性を良好にすることが望まれる。

【0013】本発明の目的は、GaN、AlNもしくはInNまたはこれらの混晶からなる成長層に対する格子不整合率が小さい活性領域を有する半導体装置を提供す

ることである。

【0014】本発明の他の目的は、格子不整合率の増大を抑制しつつヘテロ構造からなる活性領域のバンドギャップ差を大きくすることができる半導体装置を提供することである。

【0015】本発明の他の目的は、格子不整合率の増大を抑制しつつ活性領域のバンドギャップを小さくし、可視光を発生することができる半導体発光素子を提供することである。

【0016】本発明のさらに他の目的は、Ga₂N、AlNもしくはInNまたはこれらの混晶からなる成長層に対する格子不整合率が小さく、かつ良好なオーミック特性を得ることができるオーミックコンタクト層を有する半導体装置を提供することである。

【0017】

【課題を解決するための手段】第1の発明に係る半導体装置は、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つと窒素および燐を含む混晶半導体とのヘテロ構造からなる半導体層を含むものである。

【0018】第2の発明に係る半導体装置は、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つと窒素および燐を含む混晶半導体とのヘテロ構造により形成された活性領域を含むものである。

【0019】第3の発明に係る半導体発光素子は、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる半導体発光素子において、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐を含む混晶半導体からなる発光領域を設けたものである。

【0020】第4の発明に係る半導体装置は、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる成長層上に電極が形成された半導体装置において、窒化物半導体と電極との間にガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐を含む混晶半導体からなるオーミックコンタクト層を設けたものである。

【0021】特に、p型層ではn型層に比べてキャリア濃度を大きくすることができないので、良好なオーミック特性を得ることが困難である。したがって、本発明のオーミックコンタクト層を特にp型層と電極との間に設けることが好ましい。

【0022】

【作用】第1の発明に係る半導体装置においては、半導体層がガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐

を含む混晶半導体とのヘテロ構造からなるので、窒化物半導体と混晶半導体との格子不整合率が小さく、格子欠陥が少ない。

【0023】また、混晶半導体中の燐の組成比を僅かに増加させるだけでバンドギャップを小さくすることができるので、格子不整合率の増大を抑制しつつ、ヘテロ構造のバンドギャップ差を大きくすることができる。

【0024】第2の発明に係る半導体装置においては、活性領域がガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐を含む混晶半導体とのヘテロ構造により形成されているので、窒化物半導体と混晶半導体との格子不整合率が小さく、格子欠陥が少ない。

【0025】また、混晶半導体中の燐の組成比を僅かに増加させるだけでバンドギャップを小さくすることができるので、格子不整合率の増大を抑制しつつ、ヘテロ構造のバンドギャップの差を大きくすることができる。

【0026】第3の発明に係る半導体発光素子においては、発光領域がガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐を含む混晶半導体により形成されているので、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる成長層に対する発光領域の格子不整合率が小さく、格子欠陥が少ない。

【0027】また、混晶半導体中の燐の組成比を僅かに増加させるだけでバンドギャップを小さくすることができるので、格子不整合率の増大を抑制しつつ、発光領域のバンドギャップを小さくすることができる。それにより、特に可視光を効率良く発生することが可能となる。

【0028】第4の発明に係る半導体装置においては、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体と電極との間にガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つ、窒素および燐を含む混晶半導体からなるオーミックコンタクト層が設けられている。混晶半導体中の燐の組成比を僅かに増加させるだけでそのバンドギャップを小さくすることができるので、格子不整合率の増大を抑制しつつ良好なオーミック特性を得ることが可能となる。

【0029】

【実施例】図1は本発明の一実施例によるGa₂N系発光ダイオードの構造を示す断面図である。

【0030】図1において、サファイア(Al₂O₃)基板1上に、厚さ250ÅのGa₂Nバッファ層2、厚さ4μmのn-GaN層3、厚さ0.5~1μmのn-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層4、および厚さ200ÅのGa₂N_{1-x}P_x活性層5が順に形成されている。n-GaN層3およびn-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層4のキャリア濃度はいずれも2×10¹⁸cm⁻³である。

【0031】Ga₂N_{1-x}P_x活性層5上には、厚さ0.

5~1 μm のp-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層6、厚さ0.5~1 μm のp-GaN層7、および厚さ0.1~0.5 μm のp-GaN_{1-Y}P_Yコンタクト層8が順に形成されている。p-Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層6およびp-GaN層7のキャリア濃度はいずれも $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。これらの層2~8は、MOCVD法(有機金属化学的気相成長法)により連続的に成長される。

【0032】p-GaN_{1-Y}P_Yコンタクト層8からn
 $E_g = 3.44 - 0.66Y - 14.103Y(1-Y) \dots (4)$

ここで、YはGa_{1-Y}N_YP_Y中のPの組成比である。式(4)から、Ga_{1-Y}N_YP_Yのバンドギャップ E_g を3.35eVとするためには、Ga_{1-Y}N_YP_Y中のP組成比Yを0.006とすればよい。また、Ga_{1-Y}N_YP_Yの格子定数aは次式により求められる。

【0035】
 $a = 3.19 + 0.66Y \dots (5)$

したがって、式(5)から、Ga_{1-Y}N_YP_Y中のP組成比Yが0.006のときの格子定数aは3.194となる。この場合、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対するGa_{1-Y}N_YP_Yの格子不整合率は $(3.178 - 3.194) / 3.178 \times 100 = -0.5 [\%]$ となる。

【0036】このように、活性層の材料としてGa_{1-Y}N_YP_Yを用いた場合には、同じバンドギャップのGa_{1-Y}In_YNを用いた場合に比べて、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対する活性層の格子不整合率が小さくなる。

【0037】図2(a)にGa_{1-Y}In_YN中のIn組成比Xとバンドギャップ E_g との関係を示し、図2

(b)にGa_{1-Y}N_YP_Y中のP組成比Yとバンドギャップ E_g との関係を示す。

【0038】図2(a)および式(1)から、Ga_{1-Y}In_YNでは、バンドギャップ E_g を小さくするためには、In組成比Xをある程度大きくしなければならない。In組成比Xを大きくすると、式(2)からGa_{1-Y}In_YNの格子定数aが大きくなり、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対する格子不整合率が大きくなる。

【0039】一方、図2(b)および式(4)から、Ga_{1-Y}N_YP_Yでは、バンドギャップ E_g がP組成比Yの2次式となっており、P組成比Yを僅かに増加させるだけでバンドギャップ E_g をかなり小さくすることができる。この場合、式(5)からGa_{1-Y}N_YP_Yの格子定数aはほとんど増大しない。したがって、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対する格子不整合率の増大を抑制しつつGa_{1-Y}N_YP_Yのバンドギャップ E_g を小さくすることができる。

【0040】このように、活性層の材料としてGa_{1-Y}N_YP_Yを用いると、青色の光を発生させるためにP組成比Yを僅かに増加させてバンドギャップを小さくしても、Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対する格子不整合率

-Ga_{1-Y}N_YP_Y層3の上部領域までがエッチングされ、p-GaN_{1-Y}P_Yコンタクト層8の上面にNi/Auからなるp側電極9が形成され、n-GaN層3の上面にAlからなるn側電極10が形成されている。

【0033】本実施例の発光ダイオードにおいては、活性層5の材料としてGa_{1-Y}N_YP_Yが用いられている。Ga_{1-Y}N_YP_Yのバンドギャップ E_g は次式により求められる。

【0034】
 $E_g = 3.44 - 0.66Y - 14.103Y(1-Y) \dots (4)$

がほとんど増大せず、格子欠陥が増加しない。

【0041】図3にGa_{1-Y}In_YNおよびGa_{1-Y}N_YP_Yにおけるバンドギャップと格子定数との関係を示す。図3に示すように、Ga_{1-Y}In_YNでは、バンドギャップが小さくなると、格子定数が増大するが、Ga_{1-Y}N_YP_Yでは、バンドギャップが小さくなっても、格子定数の増大が小さいことがわかる。

【0042】したがって、本実施例の発光ダイオードでは、Ga_{1-Y}N_YP_Y活性層5のP組成比Yを小さくすることにより、青色の光を効率良く発生することができる。なお、Ga_{1-Y}N_YP_Y活性層5中にZn、Cd等の不純物をドーピングすることにより、禁止帯中に深い準位を作り、発光波長を長くすることもできる。

【0043】また、本実施例の発光ダイオードでは、p-GaN層7とp側電極9との間にp-GaN_{1-Y}P_Yコンタクト層8が挿入されている。Ga_{1-Y}N_YP_Yでは、バンドギャップ E_g を小さくするためにP組成比Yを僅かに増加させた場合、格子定数aがほとんど増大せず、Ga_{1-Y}N_YP_Yに対する格子不整合率もほとんど増大しない。したがって、格子不整合を抑制しつつ良好なオーミック特性を実現することができる。

【0044】上記実施例の発光ダイオードでは、p-GaN層7とp側電極9との間にp-GaN_{1-Y}P_Yコンタクト層8が挿入されているが、p-GaN層7側からp側電極9側までP組成比Yが0からYまで徐々に増加するp-GaN_{1-Y}P_Yからなるコンタクト層を用いることもできる。

【0045】また、上記実施例の発光ダイオードでは、Ga_{1-Y}N_YP_Y活性層をAl_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層に対してほぼ格子整合させているが、Ga_{1-Y}N_YP_Y活性層が他の成長層に対してほぼ格子整合するようにGa_{1-Y}N_YP_Y活性層中のP組成比Yを選択してもよい。

【0046】上記実施例の発光ダイオードはn-AlGa_{1-Y}N/アンドープGa_{1-Y}NP/p-AlGa_{1-Y}Nからなるダブルヘテロ構造を有しているが、n-Ga_{1-Y}In_YN/アンドープGa_{1-Y}NP/p-Ga_{1-Y}In_YNからなるダブルヘテロ構造としてもよい。

【0047】また、p-GaN_{1-Y}P_Y/n-AlGa_{1-Y}N、p-GaN_{1-Y}P_Y/アンドープGa_{1-Y}NP/n-AlGa_{1-Y}N、p-GaN_{1-Y}P_Y/n-GaN_{1-Y}P_Y/n-AlGa_{1-Y}N、p-Ga

NP/アンドープGaN/np-GaN/n-AlGaN等のシングルヘテロ構造、あるいはこれらのn型とp型を逆にしたシングルヘテロ構造の発光ダイオードを構成することもできる。

【0048】本発明は、複数の障壁層および1または複数の井戸層が交互に積層されてなる量子井戸構造の活性層を有する発光ダイオード、半導体レーザ装置等の半導体発光素子にも適用することができる。この場合、(Al, Ga, In) N_{1-x} P $_x$ 井戸層と(Al, Ga, In) N_{1-y} P $_y$ 障壁層との組み合わせが可能である。ただし、 $Y2 > Y3 \geq 0$ である。また、(Al, Ga, In)は、Al, Ga, Inまたはこれらの混晶を表わす。

【0049】上記実施例では、GaN系成長層を有する発光ダイオードについて説明したが、本発明は、GaN、AlNもしくはInNまたはこれらの混晶からなる成長層を有する他の半導体装置にも適用することができる。

【0050】たとえば、本発明は、GaN、AlNもしくはInNまたはこれらの混晶からなる成長層を有する発光ダイオード、半導体レーザ素子等の半導体発光素子に適用することができる。この場合、活性層の材料としてGaN、AlNもしくはInNまたはこれらの混晶を用いる。また、半導体発光素子またはその他の半導体装置のオーミックコンタクト層の材料としてGaN、AlNもしくはInNまたはこれらの混晶を用いてもよい。さらに、本発明は半導体発光素子に限らず、半導体受光素子およびその他の半導体装置にも適用することができる。

【0051】本発明で用いられる(Al, Ga, In) N_{1-x} P $_x$ 層において、P組成比Yが $0 < Y \leq 0.35$ の範囲内にあるときにバンドギャップが0から3.44まで変化し、また $Y > 0.35$ の場合には格子不整合が大きくなる。したがって、P組成比は $0 < Y \leq 0.35$ であることが望ましい。特に、(Al, Ga, In) N_{1-x} P $_x$ を発光ダイオードの光取出し側のオーミックコンタクト層の材料として用いる場合には、良好なオーミック特性を得つつ光を透過できるように、 $0 < Y < 0.2$ であることが望ましい。

【0052】

【発明の効果】第1の発明によれば、窒化物半導体と混

晶半導体との格子不整合率が小さく、かつ格子不整合率の増大を抑制しつつヘテロ構造の半導体層のバンドギャップ差を大きくすることが可能な半導体装置が得られる。

【0053】第2の発明によれば、格子不整合率が小さく、かつ格子不整合率の増大を抑制しつつヘテロ構造の活性領域のバンドギャップの差を大きくすることが可能な半導体装置が得られる。

【0054】第3の発明によれば、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる成長層に対する発光領域の格子不整合率が小さく、かつ格子不整合率の増大を抑制しつつ短波長の光を効率良く発生することが可能な半導体発光素子が得られる。

【0055】第4の発明によれば、ガリウム、アルミニウムおよびインジウムの少なくとも1つを含む窒化物半導体からなる成長層に対する格子不整合率が小さくかつ良好なオーミック特性を得ることが可能なオーミックコンタクト層を有する半導体装置が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例によるGaN系発光ダイオードの構造を示す断面図である

【図2】Ga $_{1-x}$ In $_x$ N中のIn組成比XとバンドギャップE $_g$ との関係を示す図およびGa N_{1-y} P $_y$ 中のP組成比YとバンドギャップE $_g$ との関係を示す図である。

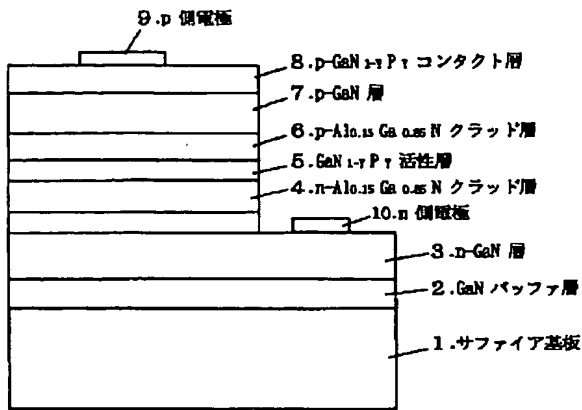
【図3】GaInNおよびGaNにおけるバンドギャップと歪みとの関係を示す図である。

【図4】従来のGaN系発光ダイオードの構造を示す断面図である。

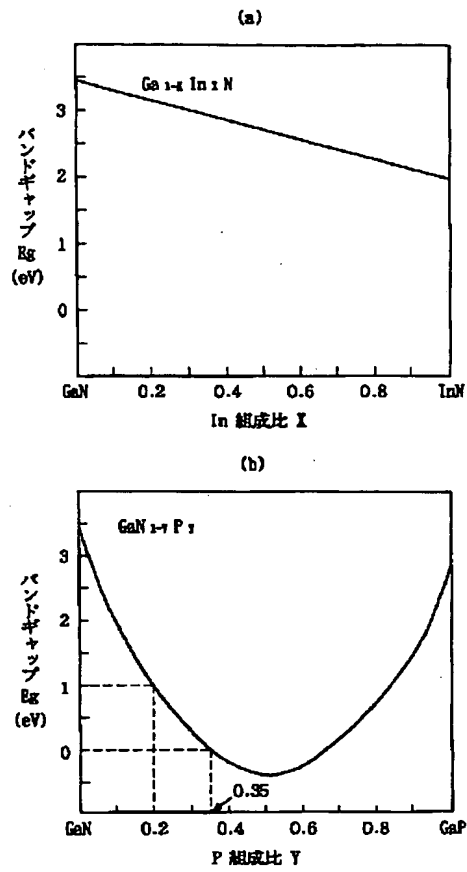
【符号の説明】

- 1 サファイア基板
- 2 GaNバッファ層
- 3 np-GaN層
- 4 np-Al $_{0.15}$ Ga $_{0.85}$ Nクラッド層
- 5 Ga N_{1-y} P $_y$ 活性層
- 6 p-Al $_{0.15}$ Ga $_{0.85}$ Nクラッド層
- 7 p-GaN層
- 8 p-Ga N_{1-y} P $_y$ コンタクト層
- 9 p側電極
- 10 n側電極

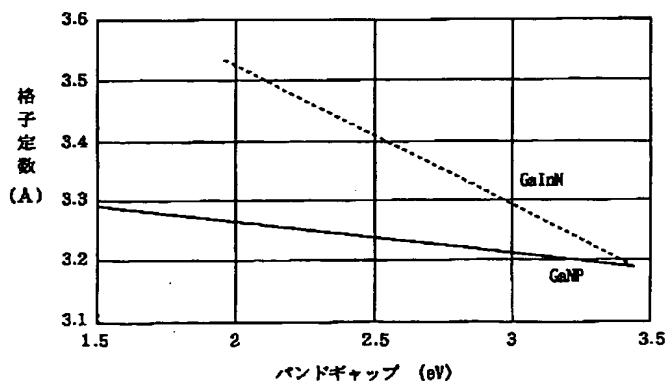
【図 1】



【図 2】



【図 3】



【図 4】

